ANALISIS KINERJA SISTEM PENDINGINAN UTAMA PADA PLTP UNIT 3 AREA ULUBELU

Indriyani, Bahrul Ilmi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Indonesia

indryinthan@gmail.com

Abstrak. Sistem pendinginan utama pada pembangkit listrik tenaga panas bumi berperan dalam membuang panas dari uap keluaran turbin dan mempertahankan kondisi vakum kondensor. Artikel ini mengevaluasi kinerja menara pendingin (*cooling tower*), kondensor, dan turbin uap PLTP Unit 3 Area Ulubelu menggunakan data operasional Juli–Desember 2023. Evaluasi menara pendingin dilakukan melalui parameter *range*, *approach*, dan efektivitas; evaluasi kondensor mengacu pada neraca massa dan energi; sedangkan kinerja turbin ditinjau melalui efisiensi isentropis. Data lapangan bersumber dari sistem *Distributed Control System* (DCS), pengamatan, dan dokumen spesifikasi peralatan. Naskah sumber melaporkan efektivitas rata-rata *cooling tower* sebesar 70,91%, sedangkan efisiensi turbin aktual pada bulan-bulan yang dirinci berada di bawah nilai spesifikasi 87,51%. Temuan ini mengindikasikan perlunya evaluasi terpadu terhadap kualitas pendinginan, kinerja kondensor, dan kondisi operasi turbin; interpretasi hasil tetap dibatasi oleh ketelitian data serta konsistensi perhitungan yang tersedia.

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga panas bumi, menara pendingin, kondensor, turbin uap, efektivitas, efisiensi.

1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) mengubah energi termal fluida panas bumi menjadi energi mekanik pada turbin dan selanjutnya menjadi energi listrik pada generator. Pada siklus kondensasi, uap keluaran turbin perlu dikondensasikan agar tekanan sisi buang tetap rendah dan fluida kerja dapat dikembalikan ke rangkaian proses. Karena itu, kinerja kondensor dan menara pendingin berkaitan dengan kondisi operasi turbin serta keluaran daya pembangkit [1], [2].

PLTP Unit 3 Area Ulubelu menggunakan sistem pendinginan yang mencakup *cooling tower*, kondensor kontak langsung, dan peralatan bantu. Perubahan temperatur air pendingin, temperatur bola basah, tekanan kondensor, serta laju aliran fluida dapat mengubah performa komponen-komponen tersebut. Kajian terhadap data operasi aktual dibutuhkan untuk mengidentifikasi deviasi dari kondisi desain dan menentukan prioritas pemeliharaan [3], [4].

Penelitian sumber berfokus pada tiga aspek, yaitu efektivitas *cooling tower*, efektivitas dan efisiensi kondensor, serta efisiensi turbin uap. Kebaruan praktis kajian ini terletak pada pembacaan terpadu data operasional Juli–Desember 2023, bukan pada pengembangan model termodinamika baru. Dengan demikian, kontribusi utama artikel adalah menyajikan indikator kinerja antarkomponen dan menunjukkan area yang memerlukan validasi data lebih lanjut.

Tujuan penelitian adalah: (1) mengevaluasi efektivitas *cooling tower* menggunakan *range* dan *approach*; (2) menelaah parameter kinerja kondensor berdasarkan neraca massa dan energi; serta (3) membandingkan efisiensi isentropis turbin berdasarkan data spesifikasi dan data operasi. Analisis menggunakan angka dan simpulan yang tercatat dalam dokumen penelitian sumber; apabila data rinci tidak tersedia pada teks yang dapat diekstrak, artikel tidak mengarang titik pengukuran baru.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1 Objek dan rancangan penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan observasi lapangan dan pengolahan data operasi PLTP Unit 3 Area Ulubelu. Objek kajian meliputi *cooling tower* tipe *mechanical induced-draught counterflow*, kondensor kontak langsung, dan turbin uap tipe *single-cylinder condensing reaction*. Data diambil dari DCS, spesifikasi/manual peralatan, observasi, wawancara teknis, dan studi literatur. Pengamatan untuk analisis *cooling tower* dilakukan pada pukul 10.00 WIB dengan interval harian selama Juli–Desember 2023, sedangkan analisis kondensor disebut menggunakan 184 sampel dalam periode yang sama.

2.2 Variabel dan sumber data

Tabel 1. Variabel penelitian dan sumber data

Komponen	Variabel utama	Sumber/rujukan
Cooling tower	Temperatur masuk (Tin), keluar (Tout), bola basah (Twb)	Data DCS; manual cooling tower
Kondensor	Laju massa, tekanan, temperatur, entalpi, beban panas	Data operasi dan neraca massa-energi
Turbin	Tekanan/temperatur inlet-outlet, laju massa, daya aktual, entalpi	Data DCS; data komisioning

.

Nilai yang diringkas dalam artikel berasal dari hasil dan kesimpulan dokumen sumber. Data mentah lengkap per jam/hari tidak direkonstruksi apabila tidak tersedia sebagai tabel yang dapat dibaca, sehingga grafik ringkasan hanya menampilkan rentang minimum–maksimum yang secara eksplisit dilaporkan.

2.3 Perhitungan kinerja cooling tower

Efektivitas *cooling tower* dinilai melalui *range* dan *approach*. *Range* menggambarkan penurunan temperatur air sepanjang menara, sedangkan *approach* menyatakan selisih temperatur air dingin keluar menara terhadap temperatur bola basah udara masuk [5], [6].

$$\text{Range} = \text{Tin} - \text{Tout} \tag{1}$$

$$\text{Approach} = \text{Tout} - \text{Twb} \tag{2}$$

$$\text{Efektivitas (\%)} = [\text{Range} / (\text{Tin} - \text{Twb})] \times 100 \tag{3}$$

Tin adalah temperatur air masuk menara (°C), Tout adalah temperatur air keluar menara (°C), dan Twb adalah temperatur bola basah (°C). Efektivitas yang lebih tinggi menunjukkan temperatur air keluar lebih dekat ke batas termodinamik yang diwakili temperatur bola basah, tetapi hasilnya harus dibaca bersama beban panas, debit, dan kondisi lingkungan.

2.4 Perhitungan kinerja kondensor

Kondensor dianalisis menggunakan pendekatan neraca massa dan energi. Dokumen sumber menyebut perhitungan fraksi uap, entalpi isentropis keluaran turbin, daya isentropis, *heat load*, *cooling-water duty*, efektivitas kondensor, dan efisiensi kondensor. Untuk campuran dua fase, kualitas uap digunakan untuk memperoleh entalpi campuran dari sifat cair jenuh dan uap jenuh [2], [7].

$$h_{2s} = hf + x(hg - hf) \tag{4}$$

$$Ps = (\dot{m}_1 - \dot{m}_3)(h_1 - h_{2s}) \tag{5}$$

$$Qout = \dot{m}_2(h_4 - h_3) \tag{6}$$

Simbol h menunjukkan entalpi spesifik, x adalah kualitas uap, $\dot{m}$ adalah laju aliran massa, P adalah daya, dan Q adalah laju perpindahan panas. Karena sejumlah persamaan pada dokumen sumber ditampilkan sebagai gambar atau tidak terbaca secara utuh, rumus yang tidak dapat dipastikan tidak direka ulang dalam artikel ini.

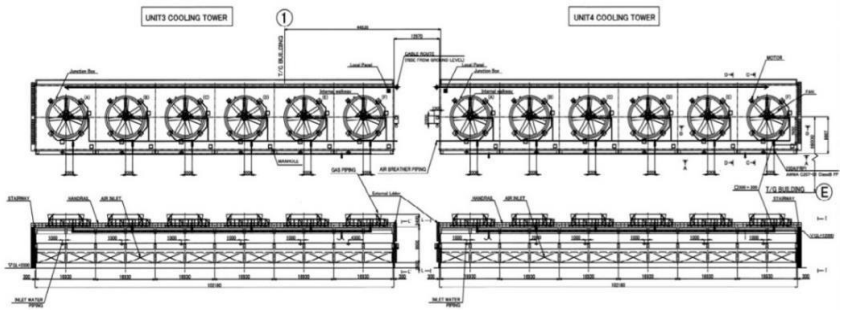
2.5 Efisiensi isentropis turbin

$$\eta t = (\text{Waktual} / \text{Wisentropis}) \times 100\% \tag{7}$$

Efisiensi turbin dihitung sebagai perbandingan daya aktual dengan daya isentropis. Perhitungan sumber menggunakan sifat uap dari aplikasi SteamTab Companion serta data laju aliran utama dan aliran menuju *ejector*.

2.6 Alur penelitian dan konfigurasi peralatan

Alur kerja penelitian terdiri atas pengumpulan data, pemeriksaan variabel, perhitungan indikator, perbandingan dengan data desain, dan interpretasi hasil. Alur ini menempatkan pemeriksaan konsistensi satuan dan data sebagai langkah penting sebelum simpulan teknis ditarik.



Gambar 1. Rancangan Menara Pendingin PLTP (diambil dari dokumen sumber).

Menara pendingin yang dikaji merupakan tipe aliran berlawanan (*counterflow*) dengan aliran udara yang digerakkan kipas. Air panas didistribusikan melalui nozzle dan bersentuhan dengan aliran udara; sebagian panas dilepas melalui perpindahan panas sensibel dan penguapan. Kinerja aktual sangat dipengaruhi oleh temperatur bola basah, distribusi air, kondisi pengisi (*fill*), kebersihan saringan, dan performa kipas [3], [5].



Gambar 2. Foto peralatan menara pendingin PLTP Ulubelu pada dokumen penelitian sumber.

Gambar peralatan dipertahankan dari dokumen sumber. Foto ini berfungsi sebagai dokumentasi objek penelitian, bukan sebagai bukti kuantitatif kinerja.

3 Hasil dan Pembahasan

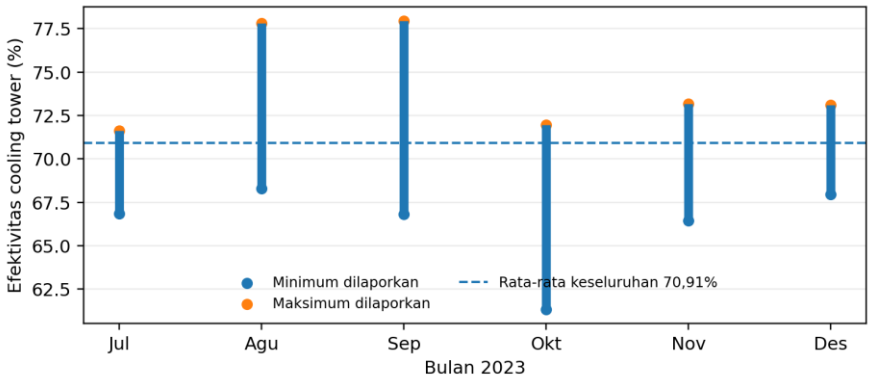
3.1 Kinerja cooling tower

Data desain yang dicantumkan dalam sumber meliputi temperatur air masuk 38,80 °C, temperatur air keluar 28,00 °C, dan temperatur bola basah 25,00 °C. Berdasarkan definisi persamaan (1)–(3), perhitungan ulang dari angka yang tercantum menghasilkan *range* 10,80 °C, *approach* 3,00 °C, dan efektivitas sekitar 78,26%. Dokumen sumber menuliskan *range* 10,90 °C dan efektivitas 78,40%; perbedaan kecil ini perlu diselaraskan dengan data presisi asli sebelum publikasi.

Tabel 2. Perbandingan parameter desain sebagaimana dilaporkan dan hasil perhitungan ulang

Parameter desain	Nilai sumber	Hasil hitung ulang
Tin	38,80 °C	38,80 °C
Tout	28,00 °C	28,00 °C
Twb	25,00 °C	25,00 °C
Range	10,90 °C	10,80 °C
Approach	3,00 °C	3,00 °C
Efektivitas	78,40%	78,26%

Pada data aktual, sumber melaporkan efektivitas rata-rata *cooling tower* Juli–Desember 2023 sebesar 70,91%. Nilai maksimum dan minimum bulanan yang dinyatakan dalam pembahasan berkisar 61,34–77,94%, dengan nilai minimum 61,34% terjadi pada Oktober dan maksimum 77,94% pada September. Dibandingkan nilai desain yang dilaporkan 78,40%, rata-rata aktual lebih rendah sekitar 7,49 poin persentase; perbandingan ini bersifat indikatif karena ketidakselarasan kecil pada angka desain perlu dikoreksi.



Gambar 3. Rentang minimum–maksimum menunjukkan rata-rata periode 70,91%.

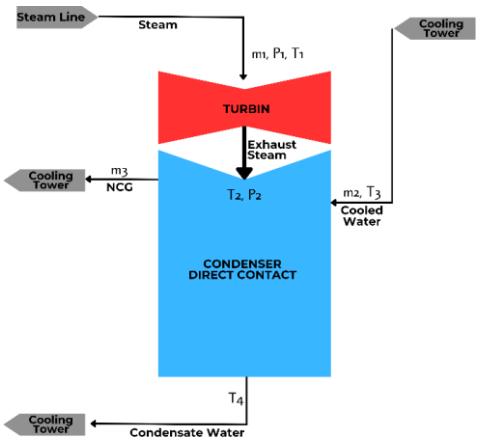
3.2 Interpretasi kinerja cooling tower

Rentang efektivitas menunjukkan bahwa kinerja tidak konstan sepanjang periode pengamatan. Penurunan hingga 61,34% pada Oktober layak ditelaah bersama kondisi cuaca, temperatur bola basah, debit air, beban panas kondensor, serta kondisi kipas dan media pengisi. Namun, tanpa data mentah lengkap dan variabel pendukung tersebut, penyebab spesifik tidak dapat ditetapkan hanya dari nilai efektivitas.

Secara operasional, sumber menyarankan pemeriksaan berkala terhadap saringan basin dari lumut, lumpur, serangga, sampah plastik, dan daun, serta pemeliharaan air pendingin. Rekomendasi ini konsisten dengan prinsip bahwa hambatan aliran, distribusi air yang tidak merata, atau penurunan perpindahan panas dapat menurunkan performa menara. Implementasi tindakan perawatan sebaiknya disertai pencatatan sebelum-sesudah agar pengaruhnya dapat diverifikasi secara kuantitatif [3], [6].

3.3 Kinerja kondensor

Analisis kondensor menggunakan data operasi Juli–Desember 2023 dengan sampel yang disebut berjumlah 184 titik. Variabel yang dipakai mencakup laju massa, tekanan, temperatur, entalpi, beban panas, dan *cooling-water duty*. Dokumen sumber menyatakan bahwa efektivitas dan efisiensi kondensor cenderung bergerak searah, yaitu peningkatan efisiensi diikuti peningkatan efektivitas pada data yang dianalisis.



Gambar 4. Skema neraca massa dan energi kondensor kontak langsung

Ringkasan hasil sumber menyebut efektivitas dan efisiensi kondensor berada pada rentang tinggi, tetapi nilai persentase rinci untuk seluruh bulan tidak dapat dipastikan hanya dari teks yang diekstrak. Oleh karena itu, artikel ini tidak menampilkan tabel bulanan yang berisi angka yang belum terverifikasi. Sebelum pengiriman, tabel data kondensor asli perlu dimasukkan kembali dari file sumber dengan memastikan kesesuaian satuan, basis perhitungan, dan definisi efektivitas/efisiensi.

3.4 Kinerja kondensor (lanjutan)

Untuk kondensor kontak langsung, evaluasi perlu mempertimbangkan beban panas yang dilepas dari uap dan gas tak terkondensasi, serta energi yang diserap air pendingin. Perbandingan antarwaktu hanya sah apabila laju massa, entalpi, tekanan, dan temperatur berasal dari kondisi pengukuran yang sinkron. Pemeriksaan neraca energi juga diperlukan untuk menilai apakah selisih antara panas masuk dan panas keluar masih berada dalam batas ketidakpastian pengukuran.

Tabel 3. Matriks pemeriksaan untuk validasi hasil kinerja kondensor

Aspek evaluasi	**Indikator**	**Pemeriksaan yang disarankan**
Neraca massa	Laju aliran masuk /keluar	Kesesuaian total massa dan basis waktu
Neraca energi	Qin dan Qout	Konsistensi entalpi, temperatur, dan satuan
Kondensasi	Tekanan/vakum kondensor	Tren tekanan bersama beban turbin
Kinerja pendingin	Efektivitas dan efisiensi	Definisi persamaan serta basis pembanding

Dokumen sumber melaporkan efisiensi kondensor tertinggi pada beberapa tanggal, termasuk 96,13% pada Juli, 94,75% pada Agustus, 96,48% pada September, 96,86% pada Oktober, 96,18% pada November, dan 102,32% pada Desember. Nilai di atas 100% pada Desember merupakan sinyal pemeriksaan, bukan bukti otomatis bahwa alat memiliki kinerja fisik di atas batas ideal. Definisi parameter, satuan, nilai entalpi, serta basis pembilang-penyebut perlu diaudit sebelum nilai tersebut dipakai sebagai indikator kinerja final.

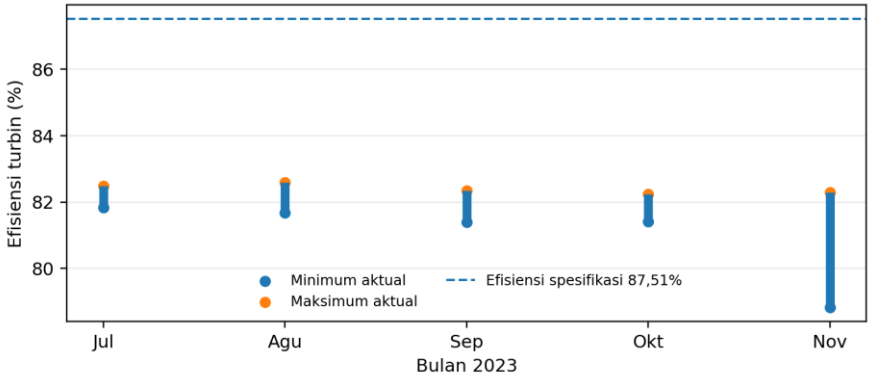
Keterkaitan kondensor dan turbin secara fisik masuk akal karena tekanan sisi buang turbin dipengaruhi oleh kondisi kondensasi. Meski demikian, hubungan sebab-akibat tidak dapat dipastikan hanya dengan tren visual; diperlukan analisis korelasi atau regresi dengan mempertimbangkan beban unit, kondisi lingkungan, laju aliran uap, dan kondisi operasi peralatan.

3.5 Kinerja turbin uap

Efisiensi isentropis turbin dihitung dengan membandingkan daya aktual dengan daya isentropis. Berdasarkan data spesifikasi yang dilaporkan, daya isentropis sebesar 67,199 MW dan efisiensi turbin spesifikasi sebesar 87,51%. Sumber juga melaporkan efisiensi aktual yang lebih rendah, yang mengindikasikan adanya deviasi dari kondisi komisioning.

Tabel 4. Rentang efisiensi turbin aktual bulanan

Bulan	Rentang efisiensi aktual	Nilai acuan spesifikasi
Juli 2023	81,84–82,48%	87,51%
Agustus 2023	81,67–82,59%	87,51%
September 2023	81,39–82,35%	87,51%
Oktober 2023	81,41–82,23%	87,51%
November 2023	78,83–82,29%	87,51%



Gambar 5. Rentang efisiensi turbin aktual yang dilaporkan dibandingkan nilai spesifikasi 87,51%. Data Desember tidak ditampilkan karena rentang angka aktualnya tidak tersedia secara jelas pada teks yang diekstrak.

Dibandingkan acuan 87,51%, rentang aktual yang dilaporkan pada Juli–November berada lebih rendah. Sumber menyimpulkan penurunan efisiensi dari data spesifikasi ke data aktual sekitar 6,07% berdasarkan daya aktual hasil perhitungan; angka ini perlu dipastikan apakah bermakna selisih poin persentase atau penurunan relatif. Pada artikel ilmiah, definisi operasional penurunan harus dituliskan eksplisit agar tidak menimbulkan ambiguitas.

3.6 Pembahasan terpadu

Hasil menunjukkan bahwa indikator *cooling tower* dan turbin sama-sama memperlihatkan deviasi terhadap acuan desain atau komisioning. Efektivitas rata-rata menara pendingin yang dilaporkan sebesar 70,91% berada di bawah nilai desain yang dicantumkan 78,40%, sedangkan efisiensi turbin aktual berada di bawah acuan 87,51%. Pola ini dapat menjadi dasar pemeriksaan sistem pendinginan dan turbin secara terpadu, tetapi belum membuktikan bahwa penurunan satu komponen secara langsung menyebabkan penurunan komponen lainnya.

Dari perspektif rekayasa, pengujian lanjutan sebaiknya menyinkronkan data temperatur air masuk-keluar menara, temperatur bola basah, tekanan kondensor, laju aliran massa uap, entalpi, dan daya turbin pada cap waktu yang sama. Validasi instrumen dan pemeriksaan satuan perlu dilakukan sebelum perhitungan ulang. Setelah itu, analisis sensitivitas atau regresi dapat digunakan untuk memisahkan pengaruh beban pembangkit dan kondisi lingkungan dari pengaruh degradasi peralatan.

Batasan utama penelitian ini adalah ketidaktersediaan sebagian tabel mentah dalam bentuk teks yang dapat diekstrak secara andal serta adanya ketidaksesuaian aritmetika kecil pada contoh perhitungan desain. Selain itu, beberapa hasil kondensor yang dilaporkan melebihi 100%, sehingga definisi dan formula perlu diaudit. Batasan ini tidak menghapus kegunaan hasil sebagai evaluasi awal, tetapi membatasi klaim kausal dan generalisasi.

4 Kesimpulan

Berdasarkan data yang dilaporkan, efektivitas rata-rata *cooling tower* selama Juli–Desember 2023 adalah 70,91%, lebih rendah daripada efektivitas desain yang dituliskan sebesar 78,40%. Rentang minimum–maksimum bulanan yang tersedia memperlihatkan variasi kinerja dan nilai terendah 61,34% pada Oktober 2023. Efisiensi turbin aktual yang dirinci untuk Juli–November juga berada di bawah acuan spesifikasi 87,51%. Kinerja kondensor dilaporkan bergerak searah antara efektivitas dan efisiensi, tetapi angka di atas 100% pada Desember harus diverifikasi sebelum dijadikan kesimpulan definitif.

Tindak lanjut yang disarankan meliputi pembersihan dan inspeksi rutin menara pendingin, pemeriksaan instrumen DCS, validasi perhitungan kondensor, serta analisis terpadu menggunakan data mentah yang tersinkronisasi. Penelitian berikutnya perlu menyajikan data lengkap, definisi setiap indikator, ketidakpastian pengukuran, dan uji statistik untuk menguji hubungan antara kinerja sistem pendinginan dan efisiensi turbin.

5 Daftar Pustaka

[1] P. Suharmanto, A. N. Fitria, and S. Ghaliyah, "Indonesian geothermal energy potential as source of alternative energy power plant," in *KnE Energy*, vol. 1, no. 1, 2018, p. 121.

[2] *Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants*, Elsevier, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821037-6.09991-1.

[3] H. Ahyadi and A. K. A. Prakoso, "Analisis perubahan sudut blade fan cooling tower terhadap performance cooling tower Unit 3 di PT.X," *Bina Teknika*, vol. 15, no. 2, p. 109, 2020, doi: 10.54378/bt.v15i2.1247.

[4] A. Sidiq and M. Anwar, "Perbandingan efisiensi turbin uap kondisi aktual berbasis data komisioning sesuai standar ASME PTC 6," *KILAT*, vol. 10, no. 1, 2021.

[5] M. A. Rahman, "Cooling tower performance analysis using range and approach methods," *Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Lambung Mangkurat*, pp. 134–135, 2022.

[6] A. Muhsin and Z. Pratama, "Analisis efektivitas mesin cooling tower menggunakan range dan approach," *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, pp. 120–121, 2018.

[7] E. N. Faizah, "Analisa performa kinerja cooling tower induced draft counter flow dengan bahan pengisi aluminium semicircular arc," *Jurnal UNEJ*, 2020.

[8] H. P. I. Sinaga, C. T. Utomo, and E. Tarigan, "Analisis performance turbin uap kapasitas 1,95 MW di PT Perkebunan Lembah Bhakti Astra Agro Lestari Tbk," vol. 3, no. 1, pp. 23–32, 2022.

[9] A. S. Karakurt and M. Gunes, "Performance analysis of a steam turbine power plant at part load conditions," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1121–1128, 2018.

[10] O. Triyansah, "Efektivitas cooling tower fan 6P-4051-GB di PT Pupuk Sriwidjaja sektor STG-BB, Palembang, Sumatera Selatan," *Rekayasa Mekanik*, vol. 4, no. 1, pp. 7–12, 2020.

[11] Z. Zulfikar, "Penambahan water coolant pada cooling tower tipe counter flow," *Jurnal Mesin Nusantara*, pp. 86–90, 2019.